Le disjoncteur Fluarc FB4

MICHEL WAGNER[1]

Le parti pris original de l'auteur, qui est de choisir un équipement du domaine électrique pour aborder une étude mécanique, est intéressant du point de vue de l'interdisciplinarité. C'est pour y faire écho que nous vous renvoyons à la rubrique « techno élec » pour la description fonctionnelle et technologique d'un disjoncteur. La maquette numérique permet d'expliciter la spécificité de celui présenté ici, qui réalise consécutivement une fermeture et une ouverture des contacts entre pôles après une phase d'armement unique.

mots-clés
CAO DAO, énergie, mécanique, modélisation

Le problème

Le disjoncteur Fluarc FB4 (Merlin Gerin) 1 est installé sur de nombreux réseaux d'alimentation dits de moyenne tension, de sites industriels (raffineries, SNCF…) et de distribution publique (agglomérations).

Lors de son fonctionnement, les phases d'ouverture et de fermeture vont engendrer un arc électrique. Or un tel arc détériore l'état de surface des contacts. Il est donc impératif d'en minimiser les effets, par le choix d'un diélectrique approprié, l'hexafluorure de souffre (SF_6), et la rapidité d'action du mécanisme.

Les contraintes du cahier des charges

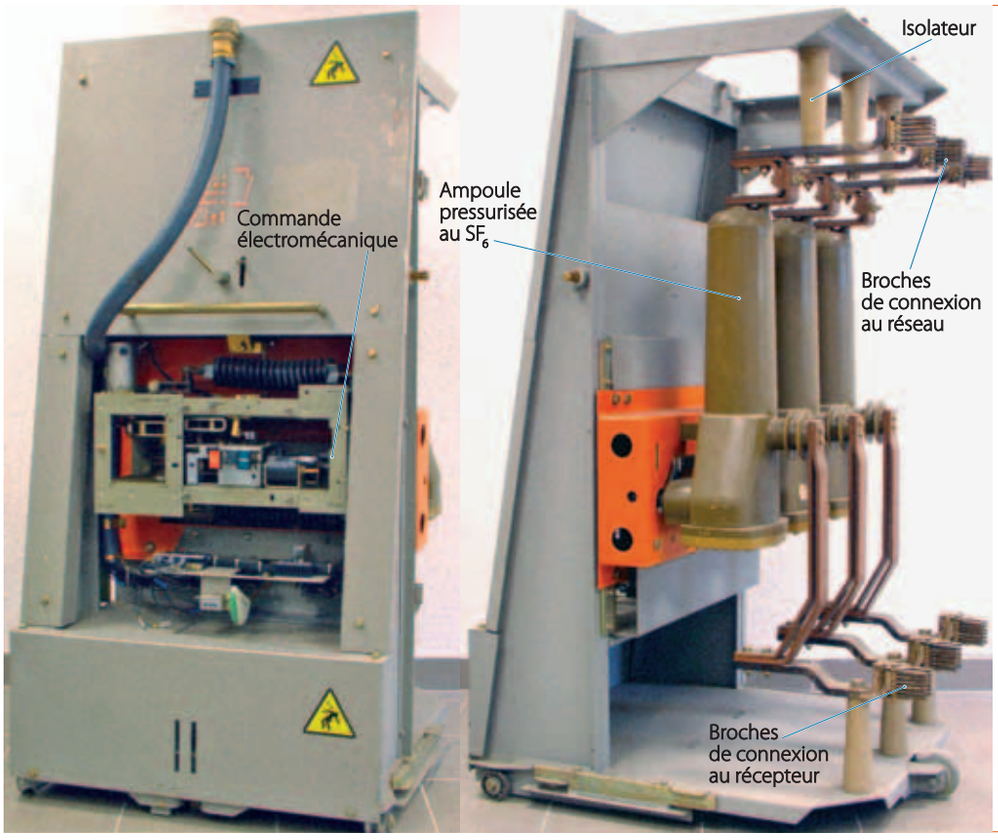
Le mouvement des pôles mobiles ouvre ou ferme les contacts entre les broches de connexion au réseau, confinées dans trois ampoules pressurisées contenant du SF_6 2. En effet, les spécifications techniques d'EDF imposent une durée d'arc conditionnant la technologie des contacts, qui doivent se trouver sous atmosphère pressurisée au SF_6, et être munis d'un dispositif de soufflage de l'arc afin de refroidir celui-ci et les pôles.

Le cahier des charges comporte également des éléments qui définissent la « qualité du réseau » :

- **La fiabilité**
- **La disponibilité**, le système devant limiter au maximum les coupures pour des questions de confort des usagers domestiques et de coût pour le secteur industriel (perturbation de la production)
- **La prise en compte du coût d'une coupure**, lié à la surconsommation due au rétablissement de l'alimentation du réseau mais aussi à l'usure d'organes tels que les pôles du disjoncteur, liée au nombre de cycles de fonctionnement

Nous mettrons en évidence l'influence de ces contraintes de sécurité et de qualité du système de protection sur les choix technologiques, dont certains sont faits en amont du fabricant par une série de spécifications techniques imposées par EDF.

La présente étude technique s'intéresse à une partie mécanique originale du disjoncteur. La dynamique des solides en action est liée aux caracté-

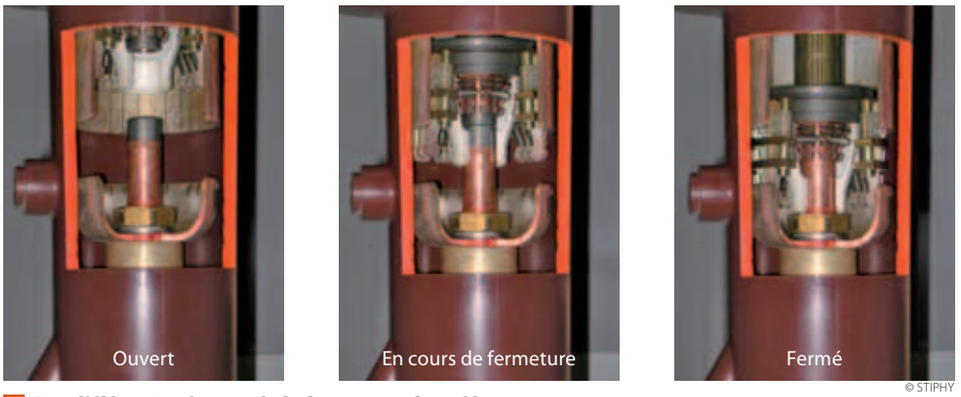


1 **Le disjoncteur FB4 à commande en plastron**

[1] Professeur agrégé de mécanique au lycée Antonin-Artaud de Marseille (13).

ristiques électriques imposées, dont voici quelques éléments :

- Tension nominale : 20 000 V
- Intensité du courant de coupure : 1 250 A
- Dimensions : H = 1,55 m ; L = 0,80 m ; P = 0,90 m
- Durée de la phase de fermeture : de 70 à 90 ms entre l'application de la tension sur le dispositif de fermeture et la jonction des contacts
- Durée d'arc < 0,02 s en ouverture et fermeture



© STIPHY

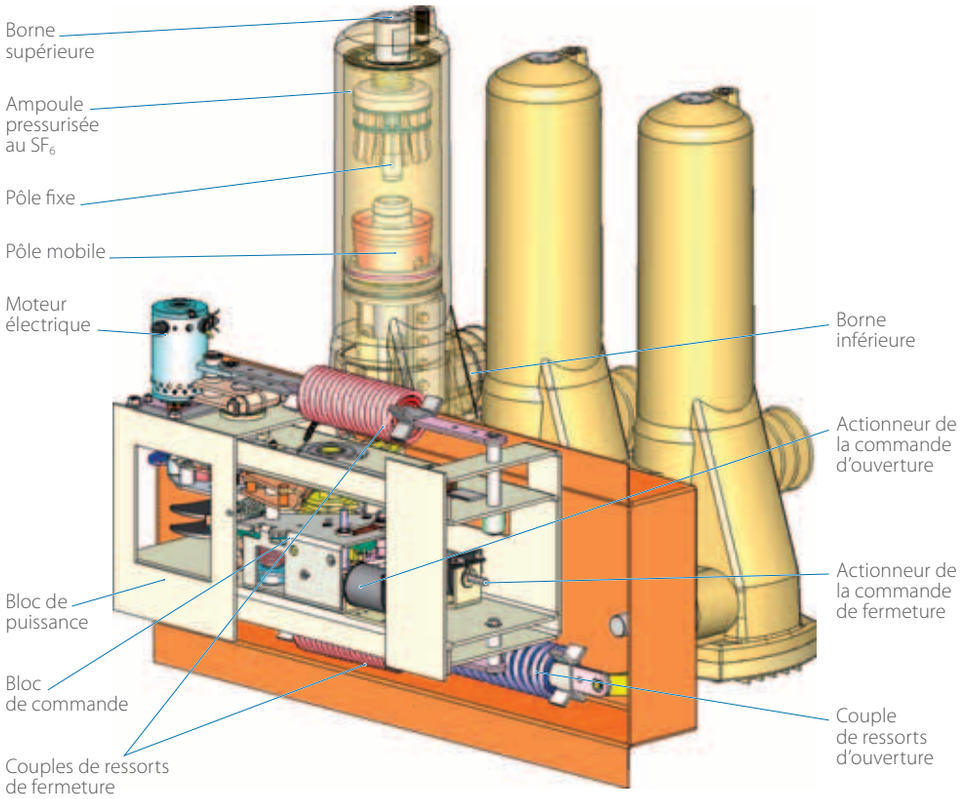
2 **Les différentes étapes de la fermeture des pôles**

Le principe de fonctionnement

Les durées maximales des phases d'ouverture (< 0,08 s) et de fermeture (< 0,1 s) imposent une transmission à cinématique très rapide, donc le choix d'actionneurs délivrant une très grande énergie pendant un temps extrêmement court.

Une grande puissance est nécessaire, mais les temps de fonctionnement sont très brefs. On a donc logiquement recours à un système à accumulation d'énergie. Ici, les concepteurs se sont orientés vers deux couples de ressorts de compression concentriques **3**.

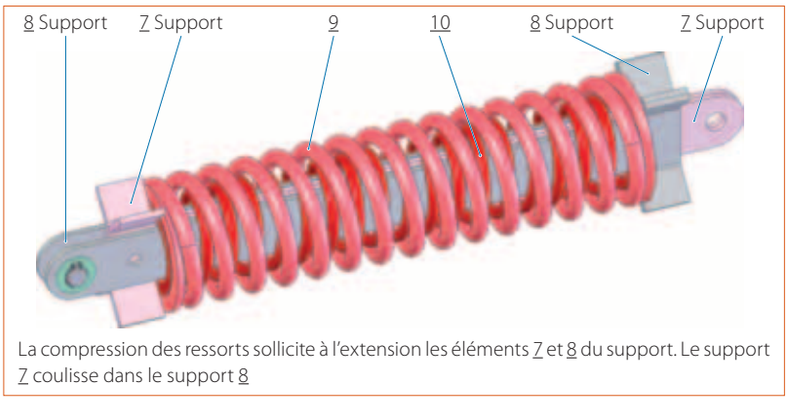
Une des fonctions de la commande GMh (références Merlin Gerin) du disjoncteur FB4 — que l'on retrouve, ainsi que la technologie des « pôles au SF_6 », sur les modèles actuels tels que SF1 fixe et SF2 fixe — est de stocker



La maquette numérique du disjoncteur Fluarc FB4

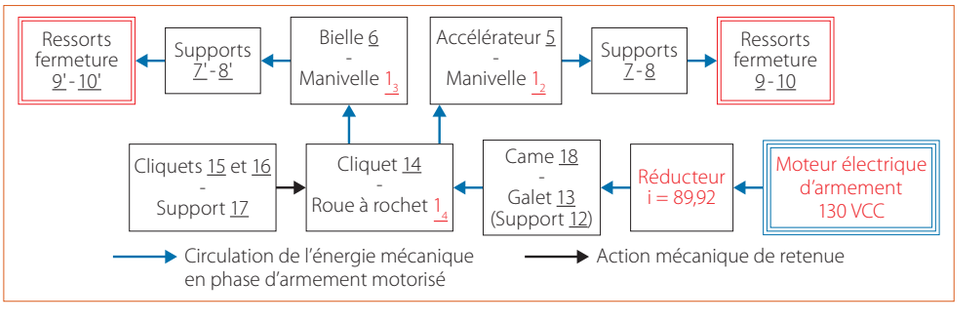
La figure ci-contre est une vue d'une maquette numérique du disjoncteur Fluarc FB4 limitée à la représentation des éléments suivants :
3 ampoules pressurisées
La transmission mécanique (bloc de puissance)
La commande mécanique (bloc de commande)
Le moteur électrique d'armement
2 couples de ressorts de fermeture
2 couples de ressorts d'ouverture
L'actionneur de la commande de fermeture
L'actionneur de la commande d'ouverture

Ce disjoncteur comporte entre autres les éléments suivants :
Des broches de connexion au réseau et aux récepteurs
3 ampoules de confinement contenant chacune un pôle fixe, des pôles mobiles et du SF_6
1 commande électromécanique (actionneurs, transmission mécanique)
Des capteurs de position
1 commande manuelle
1 système de blocage

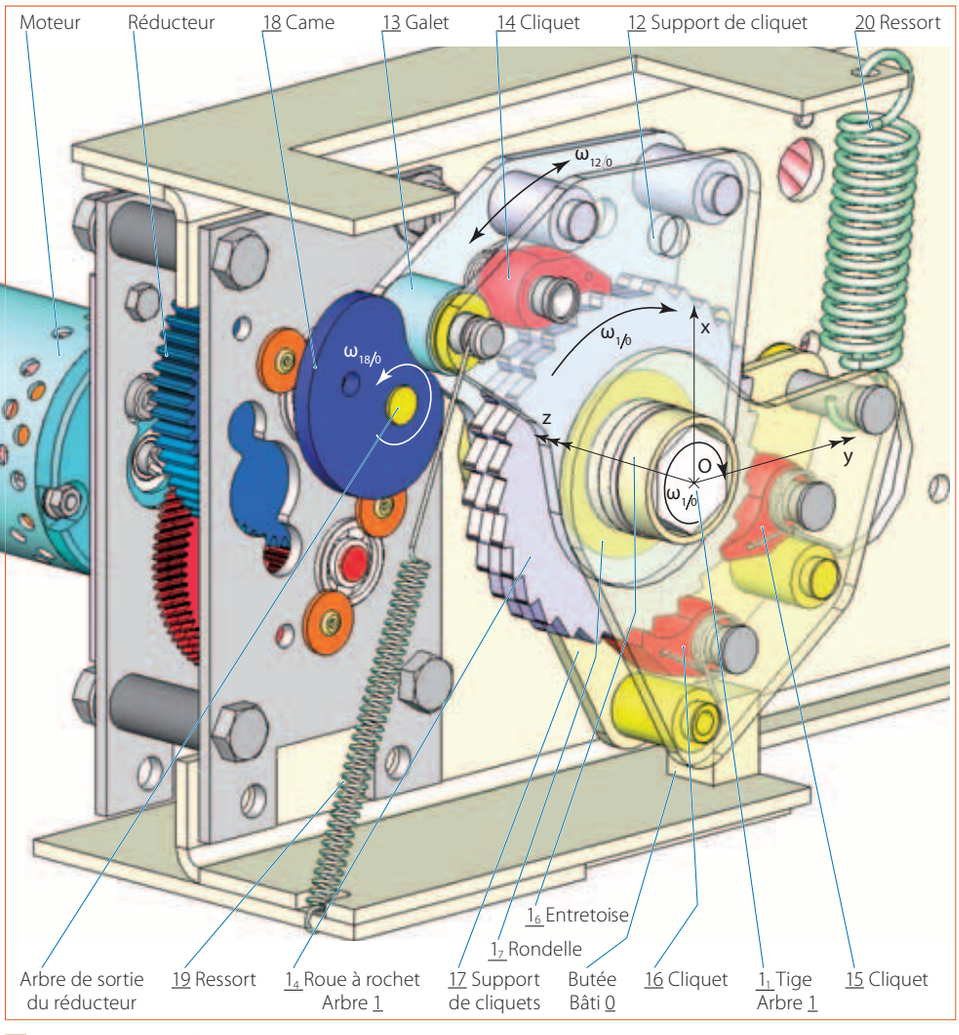


La compression des ressorts sollicite à l'extension les éléments 7 et 8 du support. Le support 7 coulisse dans le support 8

3 Un couple de ressorts de fermeture (concentriques) détendus, montés sur leurs supports


Ressorts fermeture 9'-10'
Supports 7'-8'
Bielle 6 - Manivelle 1₃
Accélérateur 5 - Manivelle 1₂
Supports 7-8
Ressorts fermeture 9-10
Cliquets 15 et 16 - Support 17
Cliquet 14 - Roue à rochet 1₄
Came 18 - Galet 13 (Support 12)
Réducteur i = 89,92
Moteur électrique d'armement 130 VCC
Circulation de l'énergie mécanique en phase d'armement motorisé
Action mécanique de retenue

4 La chaîne cinématique en phase d'armement



5 Le mécanisme d'armement

sous forme d'énergie de déformation dans les ressorts dits de fermeture l'énergie totale nécessaire à la réalisation d'un cycle fermeture-ouverture des contacts.

La gestion de cette énergie au cours des trois phases de fonctionnement — armement, fermeture, ouverture — est primordiale.

La phase d'armement (accumulation de l'énergie)

Le mécanisme d'armement manuel est utilisé lors des opérations de maintenance.

Le mécanisme d'armement électrique 4 5 est commandé à distance, depuis le poste de contrôle, par un automatisme ou par un opérateur. L'énergie est alors fournie par le motoréducteur de manière à comprimer deux couples de ressorts de compression concentriques, montés en parallèles de chaque côté du bloc de puissance 6.

Le support 12 porte le cliquet moteur 14 et un galet 13 maintenu en appui sur la came 18 de l'arbre de sortie du réducteur par le ressort 19 7.

Le support 17 porte deux cliquets de retenue 15 et 16. Il est maintenu en appui sur une butée fixe du bâti par le ressort 20. Ce support et les axes des cliquets 15 et 16 sont donc fixes dans la phase d'armement électrique.

Ces deux supports de cliquets identiques mais non solidaires sont montés en liaison pivot sur l'arbre 1.

Au cours de cette phase d'armement électrique, la came est entraînée en rotation par le motoréducteur. Elle transmet au support 12 un mouvement de balancier d'une amplitude de 15° environ.

Le cliquet 14 est moteur :

- Lors du mouvement aller du support 12, il entraîne la roue à rochet en rotation.
- Lors du mouvement retour de 12, il se soulève et recule par rapport à la roue à rochet $1_{\frac{1}{4}}$.

En fin de poussée du cliquet 14, la roue à rochet $1_{\frac{1}{4}}$ a tendance à reculer sous l'action des ressorts qu'elle comprime. Ce mouvement est limité par l'un des deux cliquets 15 ou 16.

À chaque tour de la came, la roue à rochet tourne de 1/30 de tour. La rotation de la roue 1_4 liée à l'arbre 1 et ses manivelles génère une traction sur les supports 8 et 8' qui écrasent d'un pas les ressorts. L'opération est renouvelée quatorze fois pour obtenir la compression totale des ressorts. L'armement est terminé lorsque la butée 21 est au contact du levier de commande de fermeture 22. Le capteur de position de l'arbre 1 délivre alors l'information de fin de phase d'armement (arrêt du moteur électrique). Cependant l'inertie du motoréducteur prolonge le mouvement de balancier de 12 de quelques cycles au cours desquels le cliquet 14 évolue sur le méplat de la roue à rochet 1_4 8. La suppression de la 30e dent est une sécurité de la partie mécanique qui permet d'éviter de continuer la poussée du cliquet alors que le support est bloqué.

La vérité par les courbes

Au cours de la phase d'armement, les actions $\overrightarrow{Fr}$ et $\overrightarrow{F'r}$ des ressorts de fermeture 7 génèrent un couple C_1 sur l'arbre 1. Ce couple, créé grâce au levier formé par la bielle 6 et la manivelle 1_3 d'une part, l'accélérateur 5 et la manivelle 1_2 d'autre part, s'oppose à la rotation du support 12 pendant la majeure partie de l'armement.

Le tracé 9 montre bien les sauts de couples dus aux passages de dents.

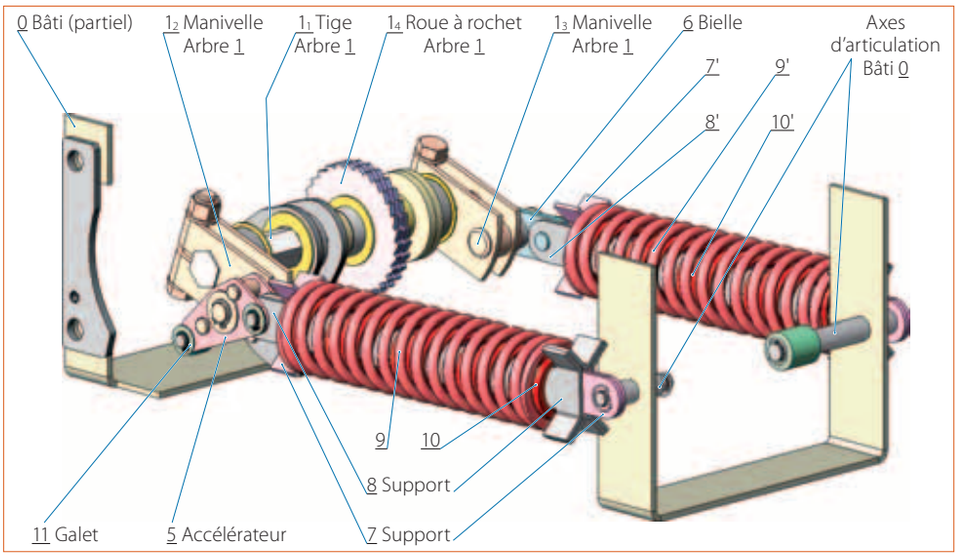
Les paliers horizontaux quant à eux correspondent à la retenue faite par les cliquets 15 ou 16.

Le point culminant de la rampe

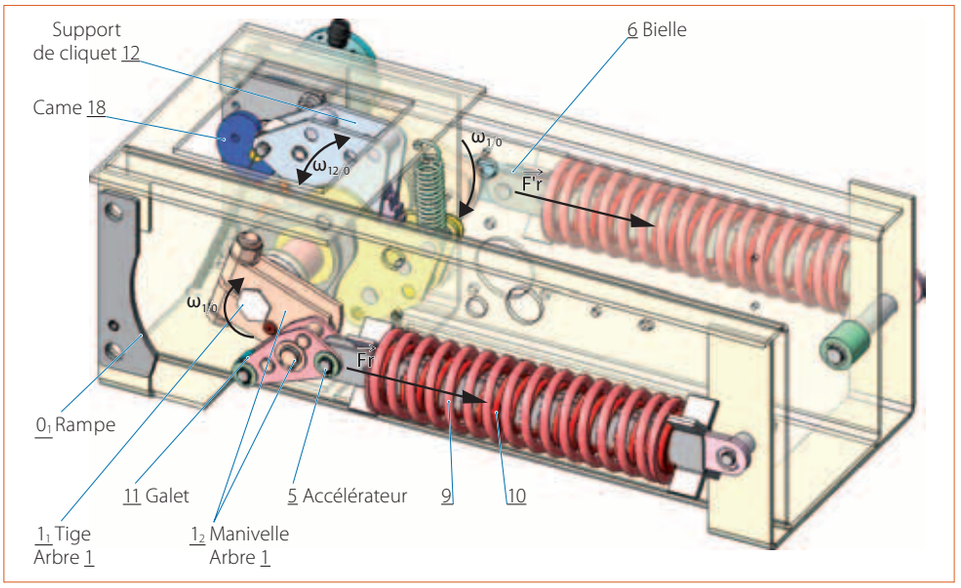
Jusqu'à 3,3 s, l'accélérateur 5 joue le même rôle que la bielle 6 (les courbes 9 se chevauchent). Dès que le contact du galet porté par l'accélérateur 5 sur la rampe 0 est établi (lors de la poussée de la dent n° 5), l'accélérateur 5 n'est plus une « simple bielle », son rôle se modifie, il devient un levier qui amplifie les efforts transmis sur l'arbre 1.

Le comportement du mécanisme est à ce moment tout à fait remarquable.

Les courbes extraites de la maquette numérique nous permettent de comprendre que les actions de 5 et de la bielle 6 sur l'arbre 1 créent un couple qui devient soudainement moteur pour 1. Le cliquet 14, qui entraînait l'arbre 1, est « en retard » dans sa poussée, l'arbre 1 s'échappe, et sa butée 21 entre en contact avec le levier 22 à l'instant t_3.



6 La compression des ressorts

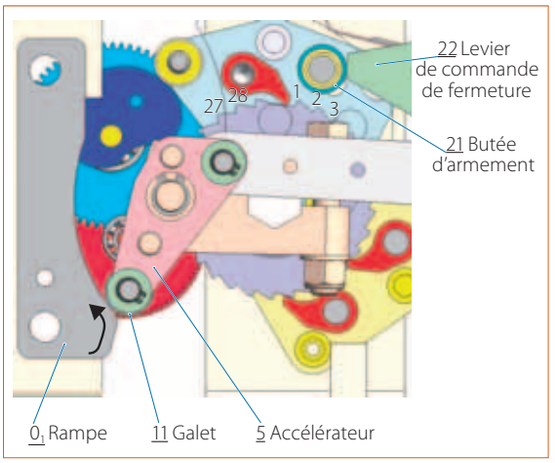


7 Le bloc de puissance en début de phase d'armement

La fin de la phase d'armement

La fin de la phase d'armement a permis de configurer le système pour le placer dans la position de début de phase de fermeture :

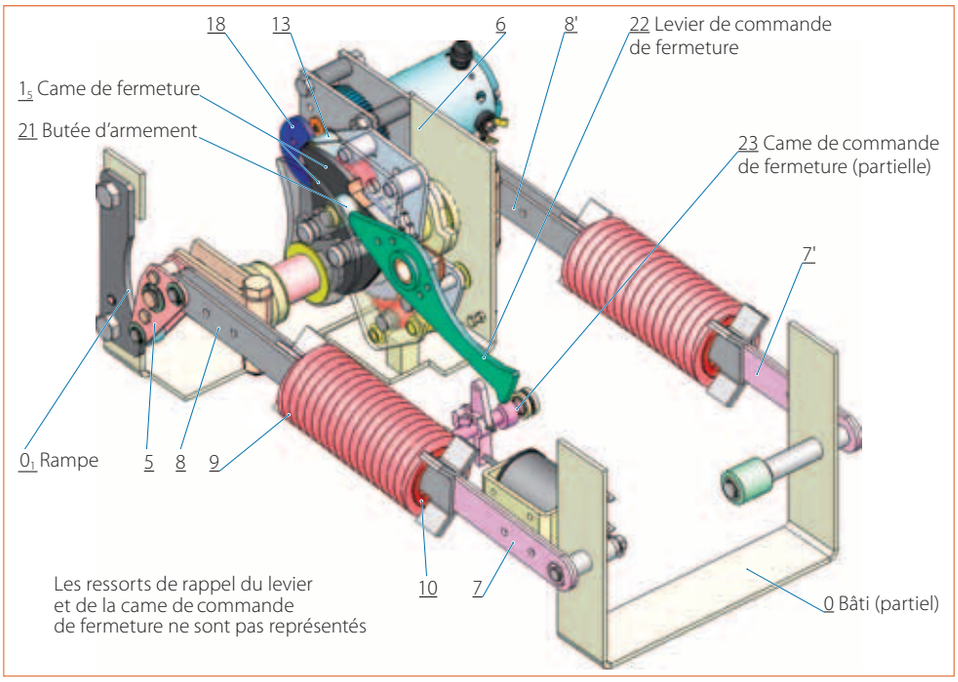
→ Les ressorts de fermeture sont au maximum de compression.



8 La fin de l'armement

$[t_0, t_1]$ = 0,4 s : durée de la poussée de la dent n° 2
t_1 : début de poussée sur la dent n° 1
t_2 : fin de poussée sur la dent n° 1
t_3 : arrêt de l'arbre 1 en butée sur le levier de commande
$[t_2, t_3]$: passage du galet sur le sommet de la rampe (voir en 8)

9 Les couples créés sur l'arbre lors de l'armement



10 Le mécanisme de retenue de l'arbre 1 en fin de phase

En ligne

Commande mécanique de type GMh et technologie des « pôles au SF_6 »

- Le catalogue 2003 *MCset Merlin Gerin – Disjoncteur débrochable*, p. 43 :
  http://www.schneider-electric.ch/custom/upload/docs/document/DOC75201.pdf
- Le catalogue des spécifications techniques d'EDF :
  http://norm.edf.fr/internet/catalogue/specif6.htm

Protection des réseaux électriques de moyenne tension (MT ou HTA)

- Le recueil des spécifications techniques EDF HN 64-S-47 d'octobre 2000 :
  http://norm.edf.fr/pdf/HN64S47.pdf
- Le recueil des spécifications d'entreprise EDF H 75 *ter* :
  http://norm.edf.fr/pdf/h200219.pdf
- Les *Cahiers techniques* diffusés par Schneider Electric, et en particulier le n° 174 :
  http://www.schneider-electric.com/cahier_technique/fr/pdf/ct174.pdf

- Le couple C_1 est moteur (> 0) et tel que sa valeur (proche de 60 N.m !) permet d'assurer une accélération suffisante en début de phase de fermeture.
- Le dispositif de commande bloque la rotation de l'arbre 1 (il la libérera lors du déclenchement de la phase de fermeture) 10.

Le mécanisme est armé.

La phase de fermeture (rapprochement des pôles)

Le mouvement de fermeture utilise l'énergie accumulée par les puissants ressorts de compression, montés en parallèles de chaque côté du bloc de puissance 11 12.

Il permet de mettre en contact les trois pôles fixes et les trois pôles mobiles 2.

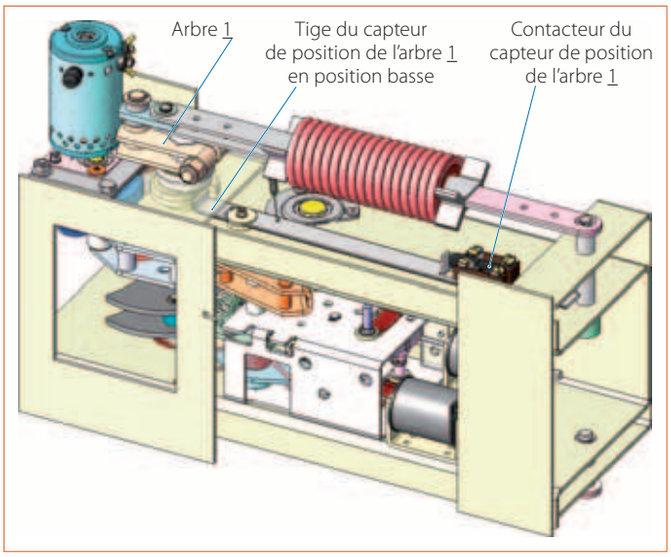
La durée annoncée par le fabricant pour la fermeture est comprise entre 70 ms et 90 ms, de l'application de la tension sur le dispositif de fermeture à la jonction des contacts.

En position « armé », les ressorts sont au maximum de la compression possible avec ce montage 11. L'arbre 1 est bloqué dans cette position par le mécanisme de commande 10 jusqu'au début de la phase de fermeture.

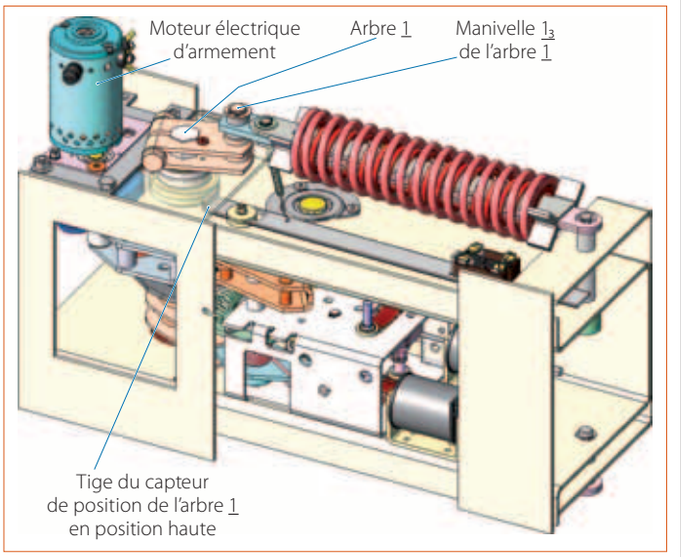
Au déclenchement de la fermeture, l'énergie des ressorts de compression est libérée par l'action d'un électroaimant sur la came de commande de fermeture 23 10.

Fait étonnant, le passage du point haut de la rampe permet à cette phase de se réaliser en faisant tourner l'arbre 1 dans le même sens de rotation 8. Le galet 11 poursuit sa course sur la rampe, les cliquets 14, 15 et 16 s'échappent, et la roue à cliquet parcours les dents de 15 à 29. La came de fermeture solidaire de l'arbre 1 tourne 10 13, ce qui va amorcer la transmission aux arbres 2 et 3 14 jusqu'à la translation de l'arbre 4 lié au pôle mobile vers les doigts du pôle fixe 15.

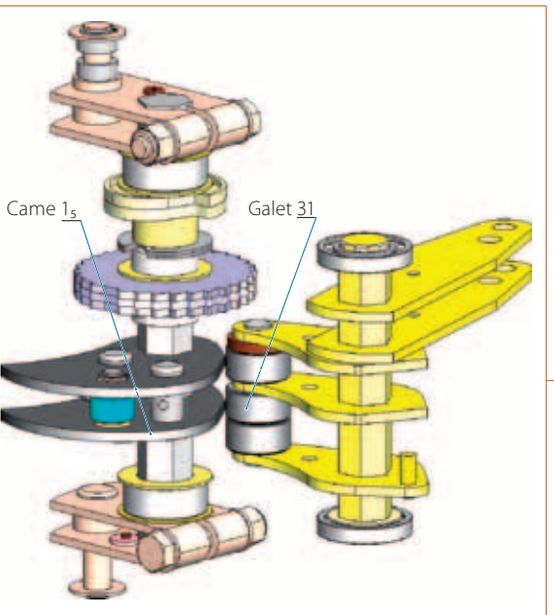
suite page 54



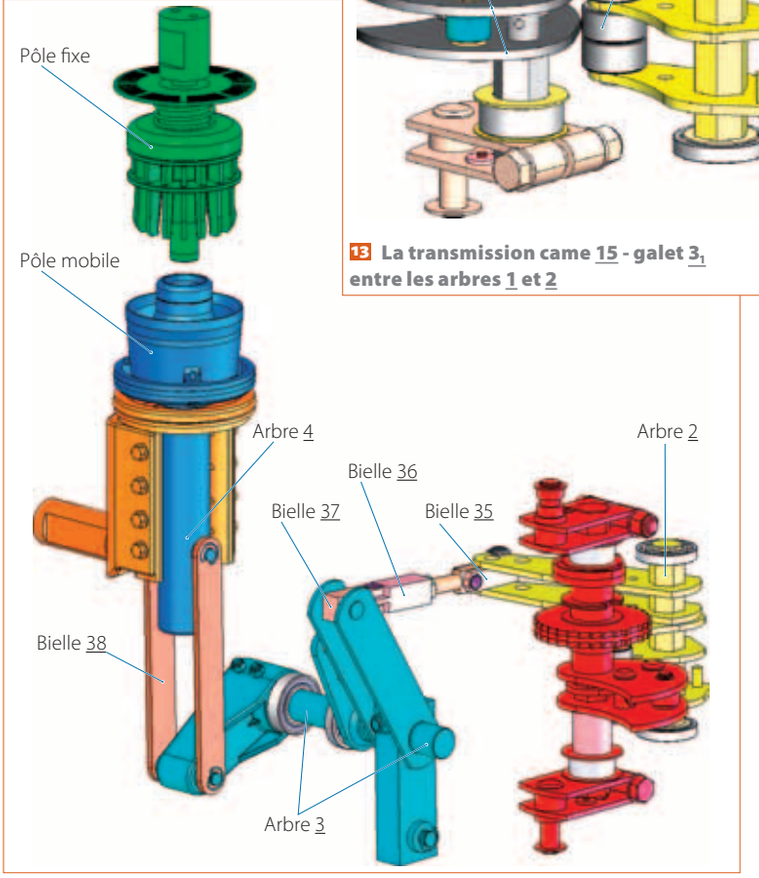
11 Les ressorts de fermeture comprimés après une phase d'armement



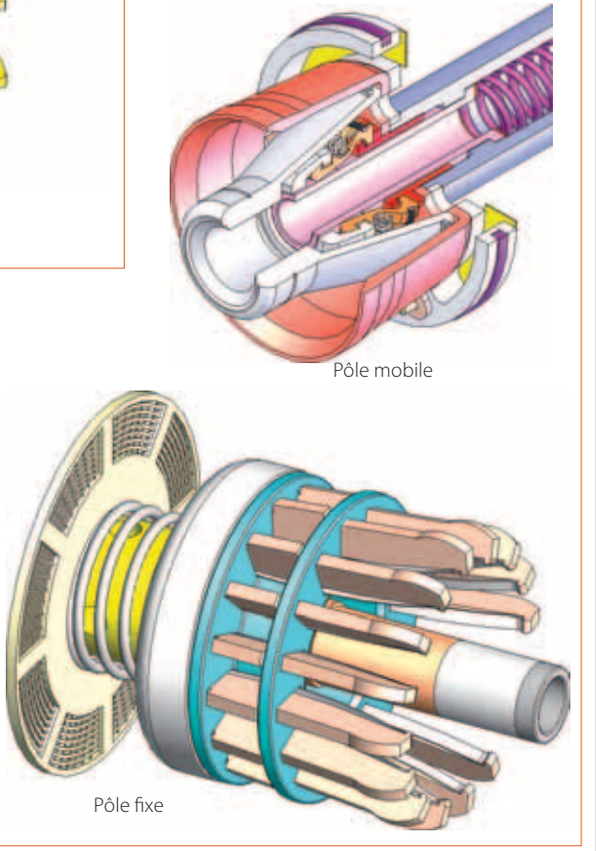
12 Les ressorts de fermeture détendus après une phase de fermeture



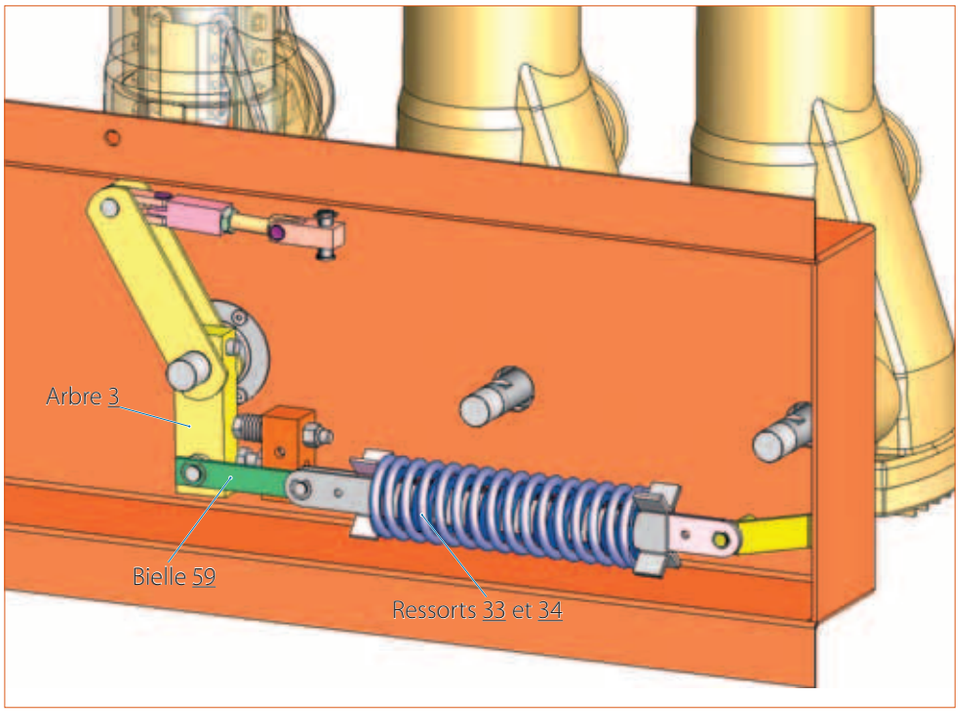
13 La transmission came 15 - galet 3₁ entre les arbres 1 et 2



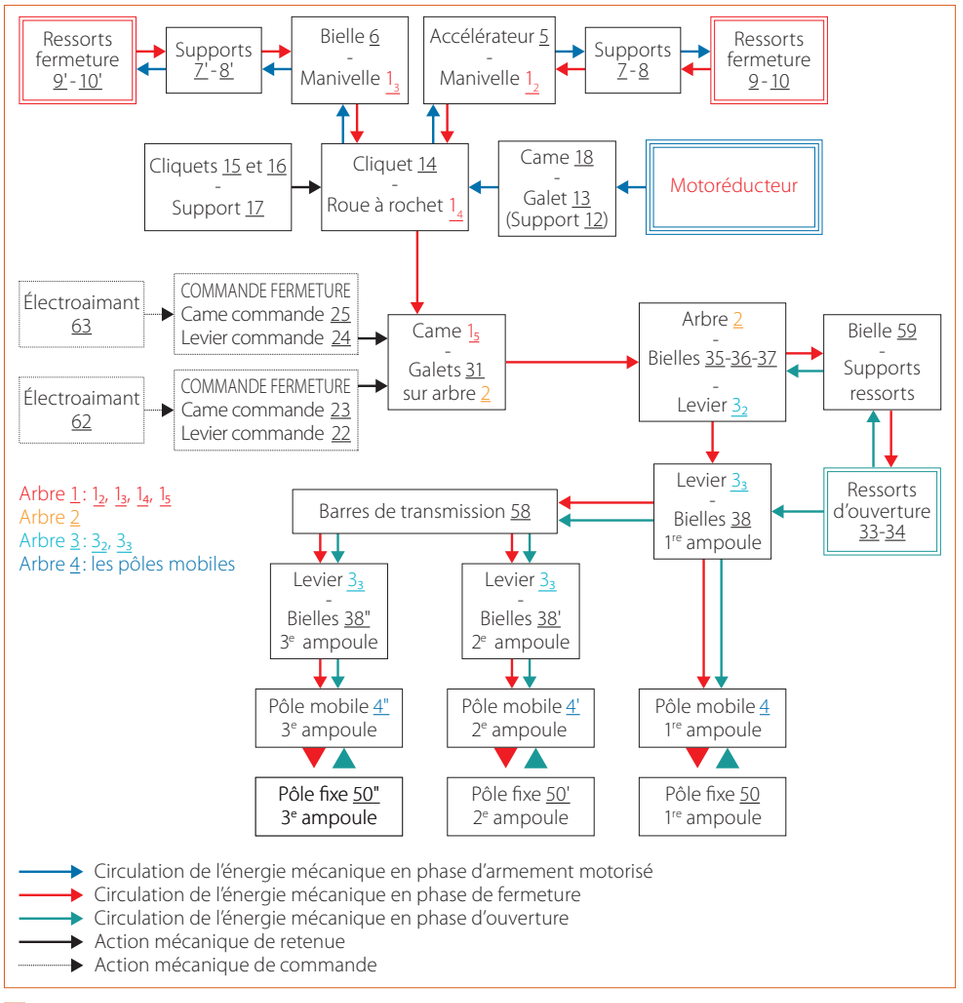
14 La phase de fermeture



15 Le pôle mobile et le pôle fixe



16 Les ressorts d'ouverture


Ressorts fermeture 9'-10'
Supports 7'-8'
Bielle 6 - Manivelle 1₃
Accélérateur 5 - Manivelle 1₂
Supports 7-8
Ressorts fermeture 9-10
Cliquets 15 et 16 - Support 17
Cliquet 14 - Roue à rochet 1₄
Came 18 - Galet 13 (Support 12)
Motoréducteur
Électroaimant 63
COMMANDE FERMETURE Came commande 25 Levier commande 24
Électroaimant 62
COMMANDE FERMETURE Came commande 23 Levier commande 22
Came 1₅ - Galets 31 sur arbre 2
Arbre 2 - Bielles 35-36-37 - Levier 3₂
Bielle 59 - Supports ressorts
Ressorts d'ouverture 33-34
Levier 3₃ - Bielles 38 1re ampoule
Barres de transmission 58
Levier 3₃ - Bielles 38" 3e ampoule
Levier 3₃ - Bielles 38' 2e ampoule
Pôle mobile 4" 3e ampoule
Pôle mobile 4' 2e ampoule
Pôle mobile 4 1re ampoule
Pôle fixe 50" 3e ampoule
Pôle fixe 50' 2e ampoule
Pôle fixe 50 1re ampoule
Arbre 1 : 1₂, 1₃, 1₄, 1₅
Arbre 2
Arbre 3 : 3₂, 3₃
Arbre 4 : les pôles mobiles
Circulation de l'énergie mécanique en phase d'armement motorisé
Circulation de l'énergie mécanique en phase de fermeture
Circulation de l'énergie mécanique en phase d'ouverture
Action mécanique de retenue
Action mécanique de commande

17 Le schéma des interactions entre blocs fonctionnels dans les trois phases de fonctionnement

suite de la page 52

La phase d'ouverture (éloignement des pôles)

Le déclenchement d'une phase d'ouverture doit pouvoir s'effectuer dans un délai de 0,3 s après celui d'une phase de fermeture.

Pour satisfaire à cet impératif de sécurité, les puissants ressorts 33 et 34 16 ont été comprimés au cours de la phase de fermeture à l'aide d'une partie de l'énergie fournie par les ressorts de fermeture 9-10 et 9'-10'.

Pour l'ouverture, les ressorts 33 et 34 agissent sur l'arbre 3 par l'intermédiaire de la bielle 59. La rupture des contacts entre les pôles fixes et mobiles et leur éloignement doivent être réalisés en 45 ms à 65 ms pour limiter les effets de l'arc électrique qui se crée durant cette phase.

La chaîne de transmission durant les trois phases (armement, fermeture et ouverture) est détaillée en 17.

Conclusion

Le mécanisme dans sa globalité est un excellent support pour une étude poussée sur des logiciels de simulation. En effet, la prise en compte des effets dynamiques (inertie des pièces) est primordiale pour l'établissement des temps d'action réels du disjoncteur. Les tracés obtenus permettront de mieux appréhender le fonctionnement fin du mécanisme et de le rendre ainsi accessible à un large public.

Les dimensions importantes de l'objet technique complet rendant difficile son installation dans une salle de classe, la maquette numérique, dès à présent disponible sur le site du CNR CMAO ainsi que l'intégralité du dossier technique, prend toute sa valeur et permettra à chaque enseignant d'exploiter, au plus près de la réalité, les possibilités pédagogiques de ce support… en attendant d'en découvrir dans les pages de *Technologie* un exemple d'application. ➡